

На правах рукописи



Саид Басем Абдулсалам Салех

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОДЕКОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ
НА БАЗЕ КОГНИТИВНОГО ПРОЦЕССОРА**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Научный руководитель: **Гладких Анатолий Афанасьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникации ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Официальные оппоненты: **Воловач Владимир Иванович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационный и электронный сервис ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти, Самарской области

Лихобабин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Защита состоится «7» сентября 2022 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д212.277.04 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГОБУ ВО УлГТУ) по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.277.04
доктор технических наук, доцент



Наместников А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Жесткость требований к надежности работы и достоверности получаемой и обрабатываемой цифровой информации в управляющих системах (УС) и средствах вычислительной техники (СВТ) в современных условиях существенно возрастают. Особое значение эти факторы приобретают для систем управления реального времени (СУРВ), от которых требуется еще и повышенная готовность к выполнению программ их действия, что особенно важно для различных категорий автономных (беспилотных) средств с их набором навигационных атрибутов. Следует отметить, что последние достижения в области оптических линий связи практика их прокладки в сложных условиях замкнутых пространств набора корпусов летательных аппаратов или плавсредств расширили возможности таких направляющих сред для организации бортовых систем управления, позволивших в разы увеличить объемы обрабатываемых данных и повысить качество управления подобными объектами.

С одной стороны, для защиты цифровых данных от помех в объектовых и бортовых системах управления не рационально использование сложных и длинных кодовых конструкций, характерных для эффективных систем турбокодирования или для систем многопорогового декодирования, а также кодов с малой плотностью проверки на четность. С другой стороны, относительно короткие избыточные коды не позволяют в процедурах их классического декодирования в полной мере реализовать возможности по исправлению ошибок. Решением задачи применения коротких избыточных кодов в СУ может явиться перестановочное декодирование (ПД). Однако формальное применение метода ПД при его классической реализации также наталкивается на ряд весьма емких в вычислительном отношении преобразований данных, что не позволяет поддерживать высокую скорость получения конечного результата, столь необходимого для СУРВ. Но именно такой способ позволяет априори получить ряд полезных в вычислительном отношении промежуточных результатов для перестановок символов кодовых векторов, которые могут храниться в когнитивной карте декодера (ККД). Это существенно снижает сложность применения метода в бортовых сетях, что несомненно способствует повышению надежности обработки данных в таких системах за приемлемые временные интервалы. При этом многие вопросы тонкой организации памяти ККД к настоящему моменту остаются явно нерешенными.

В этой связи актуальность темы исследования обусловлена наличием следующих нерешенных задач применительно к совершенствованию кодеков процессоров систем управления:

- не корректен имеющийся опыт назначения диапазона значений целочисленных мягких решений символов (МРС), востребованных оперативной обработкой цифровых команд управления реального времени;

- не выявлены статистические характеристики оценок надежности символов двоичных избыточных кодов на фиксированных длинах кодовых комбинаций в условиях изменений отношения сигнал/шум, особенно в оптических линиях;

- не обоснованы и не разработаны методы быстрого детерминированного перехода от непроизводительных перестановок нумераторов символов к перестановкам, обеспечивающих надежное получение эквивалентных кодов;

- отсутствует научно обоснованный подход к применению в процессорах приемников СУ комбинированных методов декодирования избыточных кодов с использованием итеративной процедуры «распространения доверия»;

- отсутствует регулярный подход к выявлению признаков вырожденных матриц переставленных двоичных кодов для создания априори полной когнитивной карты декодера непроизводительных перестановок;

- не разработаны методы быстрой трансформации непроизводительных перестановок нумераторов за счет надежных символов, не вошедших в обрабатываемую перестановку.

Степень разработанности темы исследования

Активное внедрение в современную практику интеллектуальных систем управления (ИСУ), адаптированных к решению широкого круга задач управления в различных предметных областях, базируется на гибком синтезе принципов построения классических СУВР, телекоммуникационных систем (ТКС), сетевых технологий (СТ) и методов машинного обучения. Классические системы управления (СУ) имеют в своем составе четыре важных элемента: управляющий элемент и управляемый элемент, между которыми в общем случае находится среда обмена командами управления в прямом и обратном направлении. В такой СУ по прямому каналу, как правило, передаются сигналы и команды управления о целевой функции СУ, а по обратному каналу передаются данные о результатах реализации управляемым элементом СУ принятых сигналов и команд. Определенная телекоммуникационная составляющая общей системы управления проявляется в совокупности прямых и обратных каналов связи, по которым осуществляется передача данных (возможно голоса или видеоизображения) в цифровом формате. Для любой СУРВ повышается роль составляющих, связанных именно со средой обмена командами управления поскольку именно этот элемент структурной схемы, существенно влияет на информационную надежность СУРВ. Под информационной надежностью СУ в отличие от аппаратной надежности следует понимать точность выполнения команд управления, которая не связывается с аппаратными отказами, а зависит от уровня мешающих факторов в среде обмена командами, реализующих целевую функцию УС. Отсюда следует, что в любой СУРВ с элементами ТКС и СТ последние оказывают решающее влияние на информационную надежность передаваемых по ним цифровых команд управления (ЦКУ), поскольку именно их структуры в формате радиоканалов в силу объективных причин подвержены наибольшему влиянию мешающих и деструктивных факторов даже в отсутствии аппаратных отказов.

Перспективы использования оптоволоконных систем (ОВС) наталкиваются на повышение стоимости приемного оборудования, которая может быть снижена только за счет использования прямой коррекции ошибок. При этом в ОВС возникает новая проблема, заключающаяся в согласовании темпов поступления данных на выходе демодулятора с возможностью соответствующей обработки их в системе исправления ошибок микропроцессором приемника СУ. В ряде работ для этого предлагается использовать ПД, теоретические основы которого заложены в работах F. J. MacWilliams, W. Wesley Peterson, E.J. Weldon, R.H. Morelos-Zaragoza, P.L. Добрушина, С.И. Самойленко, В.В. Зяблова, К.Ш. Зигангирова. В ходе исследований были использованы труды Л.М. Финка, Д. Д. Кловского, В.В. Золотарева, И.С. Клименко, В.С. Анфилатова, А.А. Емельянова, С.П. Дмитриева и зарубежных авторов G. Clark, G.D. Forney, R.W. Hamming, R.T. Chien, E.R. Berlekamp, J.L. Massey, I.S. Reed, G. Solomon, R.C. Bose, J.F. V. Sklar, J.G. Prokis, A.J. Viterbi и др.

Классический метод ПД заключается в формировании на приеме жестких и целочисленных мягких решений символов (ЦМРС) и целенаправленной перестановке наиболее надежных из них на позиции информационных разрядов кодового вектора и кодирование этих надежных символов для получения эквивалентного кода (ЭК).

Уникальной особенностью предложенного ПД является предварительное вычисление перестановок нумераторов жестких решений, связанных со структурой ЭК, которые могут априори определяться приемным процессором СУРВ. Такой составляющей является множество допустимых перестановок нумераторов символов кодовых векторов, для которых ЭК, порождающие матрицы которых могут быть вычислены заранее. Если подобные матрицы вычисляются непосредственно в ходе обработки ЦКУ и результат вычисления заносится в память ККД, то такой процессор СУРВ по сути отражает процедуру его обучения. В последующем, после обучения, это обеспечивает замену сложного вычислительного процесса при поиске ЭК на готовый результат данных памяти о таких кодах в ККД. В совокупности это дает существенный выигрыш по времени в ходе обработки кодового вектора, что играет положительную роль в согласовании темпа поступления данных из демодулятора и скорости обработки этих данных декодером процессора приемника СУРВ и, следовательно, повышению информационной надежности ЦКУ.

Цели и задачи исследования

Целью работы является: разработка способов сокращения времени реакции цифровой системы управления за счет обеспечения высокой функциональной надежности и передачи цифровых команд управления реального времени на базе кодеков с перестановочным декодированием и системой когнитивных преобразований.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи.

1. Теоретически обоснован и предложен метод выбора граничных значений МРС для каналов различной физической природы.

2. Оценен асимптотический выигрыш по достоверности и скорости обработки ЦКУ в кодеках процессоров СУРВ в условиях использования комбинированных методов декодирования данных.

3. Предложен регулярный способ априорного выявления множества непроизводительных перестановок нумераторов символов кодовых векторов систематических блоковых кодов на базе оценки их весовых спектров.

4. Разработан быстрый алгоритм поиска образующей орбиты циклических сдвигов нумераторов кодового вектора по произвольной перестановке для выявления соответствующей ей порождающей матрицы эквивалентного кода.

5. Обосновано и предложено устройство эффективной обработки сигналов управления за счет упреждающего выявления непроизводительных перестановок.

Объект исследования

Объектом диссертационного исследования является когнитивная система перестановочного декодирования, используемая для защиты управляющей цифровой информации от влияния мешающих факторов при ее передаче в среде обмена командами управления от управляющей системы к управляемому объекту (или обратно).

Предмет исследования.

Предметом исследования являются алгоритмы когнитивной мягкой обработки избыточных кодов в системе прямой коррекции ошибок на базе ПД.

Соответствие рассматриваемой специальности

Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1 и 3 паспорта специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Научная новизна

1. Определены оптимальные, в смысле оценки верхних граничных значений ЦМРС, *отличающиеся* учетом свойств используемых каналов связи различной физической природы.

2. Впервые предложен метод мягкого декодирования комбинаций избыточных кодов, *отличающийся* снижением вычислительных затрат при использовании принципа «распространения доверия» с локализацией ограниченного числа перестановок в системе перестановочного декодирования.

3. Разработан регулярный метод поиска комбинаций непроизводительных подстановок, *исключающий* переборный метод поиска таких подстановок за счет учета весового спектра кода и процедуры разбиения пространства кодовых комбинаций на кластеры.

4. Предложен алгоритм быстрого поиска образующей комбинации циклической орбиты перестановок, *отличающийся* сочетанием двунаправленных циклов поиска образующей комбинации.

5. Разработано устройство перестановочного декодера, *отличающегося* упреждающим выявлением непроизводительных перестановок.

Теоретическая значимость работы

Предложена существенная модификация метода ПД применительно к защите ЦКУ от негативного влияния возможных мешающих и деструктивных факторов, действующих в каналах связи СУ. Проведенным исследованием установлена целесообразность снижения максимальной оценки МРС в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) с 7 до 3, поскольку это в большей степени соответствует особенностям вероятностных характеристик процедуры фиксации сигнала для подавляющего большинства подобных каналов связи. Этот подход позволил на 50% сократить число итеративных преобразований в ходе обработки ЦМРС методом «распространения доверия», что повышает не только информационную надежность ЦКУ, но и оперативность получения конечного результата. Применение указанного метода к системе ПД на основании аналитического моделирования показало на возможности получения более значимого энергетического выигрыша кода (ЭВК), чем это утверждалось ранее.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в строгом, теоретически обоснованном, выборе параметров двоичных избыточных кодов, предлагаемых для использования в кодах СУ и во внутриобъектовых сетях для решения вопросов опережающей защиты от ошибок на базе ПД, существенном повышении ЭВК и сокращении времени обработки данных при использовании относительно коротких избыточных кодах. Особое значение в минимизации объема памяти ККД приобретает предложенная схема регулярного вычисления вырожденных матриц ЭК на базе кластеризации пространства кодовых векторов и использования циклических свойств подстановок.

Материалы диссертации включены в учебный материал для обучения бакалавров по направлению 11.03.02 в УлГТУ на кафедре телекоммуникации в учебных дисциплинах «Общая теория связи 2», «Цифровая обработка сигналов» и «Комплексное обеспечение информационной безопасности инфокоммуникационных сетей и систем» при выполнении индивидуальных заданий по курсовому проектированию и расчетно-графических работ.

Методы исследования

Для решения поставленных задач и достижения обозначенной цели применены методы системного анализа, отдельные элементы алгебры теории групп, колец и полей, методы математического моделирования, теории вероятности и теории управления, численные методы.

Положения, выносимые на защиту

1. Доказана *целесообразность* снижения максимальной оценки ЦМРС в системе их целочисленных значений, позволившая получить некоторый выигрыш в процедуре ранжирования нумераторов кодового вектора и

гарантированно снизить на 50% и более число итеративных преобразований в процессоре приемника ЦКУ в ходе параметрической адаптации значений ЦМРС.

2. Предложенная технология обособленного контроля проверочных разрядов кодового вектора в кодеках СУ реального времени с целью *детерминированного формирования* ограниченного числа результативных перестановок в ходе обработки принятых комбинаций.

3. Показано, что система предварительного вычисления подмножества эталонных матриц и их лексикографического хранения, *обеспечивает снижение требований* к объему памяти когнитивной карты декодера за счет использования свойств циклических орбит допустимых в коде перестановок.

4. Доказано, что априорное вычисление непроизводительных подстановок нумераторов на основе знаний весового спектра кода, по сравнению с методом прямого перебора, способствует повышению производительности процессора приемника за счет быстрого перехода к ближайшей производительной перестановке.

Степень достоверности результатов

Результаты работы базируются на использовании общепринятой методологии исследований в области теории управления, общей теории связи, аргументированным применением известных научных положений теории построения помехоустойчивых кодов, корректным привлечением методов математической статистики, теории вероятностей и исследования операций апробации созданного программно-аппаратного комплекса и подтверждаются соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов

Результаты работы опубликованы в 15 печатных трудах, в числе которых 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 научная статья в научном журнале, индексируемом в Scopus, 1 патент РФ на изобретение, 9 трудов и тезисов докладов на Международных и Всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях.

Личный вклад автора

Автору работы принадлежат разработка и программная реализация алгоритма параметрической адаптации значений ЦМРС в составе принятого кодового вектора с мягкими решениями, принцип поиска перестановочных и порождающих матриц двоичных эквивалентных кодов в системе перестановочного декодирования путем линейных преобразований известных декодеру эталонных матриц. В совместных работах автор проводил рассуждения по обоснованию актуальности темы исследования и выработке концептуальных направлений совершенствования аппаратных решений в процедуре поиска эквивалентных кодов, выполнял вывод аналитических соотношений, проведение расчетов, составление математических моделей и проведение испытаний имитационных моделей, обобщение и интерпретацию результатов таких испытаний. Персоналии, выполнявшие совместные

исследования и имеющие отношение к теме диссертационной работы, представлены поименно в качестве соавторов конкретных совместных публикаций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и двух приложений, содержит 145 страниц машинописного текста, в том числе 47 рисунков и 41 таблицу. Список литературы включает в себя 156 наименований. В приложениях к диссертации представлен патент на изобретения, а также копия акта внедрения результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе

Синтез СУ представляет собой множество N допустимых алгоритмов реализации целевой функции управления $F\{N, H, T, I\}$, в которой: H – множество условий функционирования СУРВ, T – временные ограничения при реализации процедуры управления, I – требования к информационной надежности, как правило, в формате достоверности цифровых данных при передачи их по прямому и обратному каналам связи. Дается обобщенная структурная схема СУ с описанием ее главных атрибутов. Естественные влияния внешней среды в СУ представлено через индексы P в районе действия управляющей системы и через P' в зоне действия объекта управления, поскольку $P \neq P'$. В случае необходимости по результатам оценки сигналов обратной связи управляющая система вырабатывает дополнительные сигналы для достижения параметров ЦФ $F\{*\}$, чем реализуется принцип управляемости.

Во многом принцип управляемости СУ реализуется за счет наличия ресурсов управления, способствующих безусловному достижению целевой функции $F\{*\}$. В качестве таких ресурсов, например, могут выступать методы параметрической или структурной адаптации.

С общетеоретических позиций система связи (в частности канал связи) СУРВ является наиболее уязвимы местом с точки зрения искажений сути сигналов управления. Деструктивные факторы природного характера могут быть значительно усилены за счет перехвата сигналов управления, их последующего анализа и использования выявленных уязвимостей для постановки преднамеренных помех антагонистическим игроком. Принципиально это подчеркивает роль защиты сигналов управления с использованием методов помехоустойчивого кодирования и криптографии, что обеспечивает принцип наблюдаемости объекта управления, когда глобальное

уравнение системы имеет единственное решение. Именно по этой причине процедура оптимизации любой СУРВ к работе в сложных условиях с высокими требованиями к достоверности передачи требует дополнительные элементы защиты данных для достижения целевой функции, к примеру помехоустойчивое кодирование. К множеству закономерностей реализации эффективных СУ следует отнести: наличие целевой функции (наличие цели управления); наличие наблюдаемости объекта; наличие управляемости управляемого объекта; наличие критерия эффективности управления; наличие ресурсов управления; наличие свободы выбора: либо среди режимов интеллектуальной СУ, либо у лица, принимающего решение.

Для достижения поставленной цели анализу подвергались различные методы повышения достоверности данных в системах с использованием помехоустойчивых кодов. Показывается возможность использования данных методов в комплексном виде для развития общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств СУ. В частности, предлагается повысить достоверность данных за счет совместных оценок априорных и апостериорных данных о ЦМРС, относящихся к конкретным проверочным соотношениям избыточных кодов. В общем случае алгоритм описывается выражением вида:

$$\begin{aligned} L(d_1) \boxplus L(d_2) &\approx L(d_1 \oplus d_2) \approx \\ &\approx (-1) \times \text{sign}[L(d_1)] \times \text{sign}[L(d_2)] \times \min\{|L(d_1)| \cup |L(d_2)|\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где обозначение \boxplus – символизирует действия представленное нижней строкой формулы; $L(d_1)$ – статистически независимые информационные биты, а $L(d_2)$ – биты четности от сочетаний $L(d_1)$. Важно отметить, что граничные оценки для соотношений информационных битов и битов четности имеют вид:

$$L(d) \boxplus \infty = -L(d). \quad (2)$$

Принципиально это означает, что большая разница в оценке ЦМРС информационных и проверочных битов приводит к инверсии жесткого решения информационного бита, иначе говоря, к коррекции четности или исправлению ошибки в фиксации жесткого решения. С другой стороны, если проверочный символ имеет минимальное значение, то выражение (2) приобретает иной вид:

$$L(d) \boxplus 0 = 0. \quad (3)$$

Это означает, что для коррекции ошибок целесообразно иметь высокие значения ЦМРС для символов проверки четности. Однако вопрос динамического изменения МРС при исправлении жестких решений символов подробно не исследовался. Впервые указанные преобразования предлагается использовать для совершенствования методов ПД.

Анализируется возможность достижения асимптотической оценки для достижения максимума энергетического выигрыша в системе с избыточным кодированием $2k - 1 = n$. По результатам анализа известных возможностей ПД в главе делаются выводы, отмечаются недостатки известных технических решений в предметной области и осуществляется постановка задач на исследования.

Во второй главе осуществляется подробное изучение метода ПД применительно к решению задач защиты данных от ошибок в современных СУВР. Это связано с повышенными возможностями такого метода по исправлению ошибок, с возможностью относительно простого использования его в алгоритмах защиты, информационной составляющей команд управления. Известно, что при реализации ПД необходимы ЦМРС для каждого элемента кодовой комбинации, обрабатываемой декодером. Полученный в ходе исследований результат говорит о том, что, традиционно применяемое по А.Ж. Витерби максимальное значение мягкого решения $\lambda_{max} = 7$ не совсем оправдано для использования в процессоре приемника, выполняющего вычисления по формуле

$$\lambda_i(z) = \left\lfloor \left\lfloor \frac{\lambda_{max}}{\rho \sqrt{E_b}} \times z_i \right\rfloor \right\rfloor, \quad (4)$$

где ρ – интервал стирания (обычно $0 < \rho < 1$), а z – принятое приемником значение сигнала. Функция (4) представляет собой линейную зависимость. Установлено, что применительно к каналам с АБГШ целесообразно принять в качестве максимальной оценки значение $\lambda_{max} = 3$, поскольку практически значимые условные плотности распределения вероятностей в подобных каналах редко превосходят значение 1.

По предварительной оценке, это дает ряд преимуществ в организации работы процессора приемника СУВР. Во-первых, вдвое уменьшается значимое число оценок, что положительно сказывается на разрядности оценок в двоичном формате и на процедуре их сортировки. Отсюда следует ожидать, что время сортировки $\lambda_i(z)$ длине кодового вектора уменьшается вдвое. Во-вторых, сокращается цикл формирования перестановочной матрицы, которая является обязательным атрибутом системы ПД. В-третьих, оценка $\lambda_{max} = 3$ оказывается в большей степени сбалансирована по параметрам канала связи с АБГШ в диапазоне отношений сигнал/шум характерного для подавляющего большинства реальных каналов связи. Исключение составляют только каналы оптической связи.

Возникает целесообразность сравнить вероятностные характеристики процедур получения ЦМРС для исследуемых вариантов. При этом важно выявить характеристики появления ошибок при формировании ЦМРС с максимальными значениями. Если при реализации процедуры ПД в группу надежных k символов будет отфильтрован символ с высокой оценкой надежности, но имеющего ошибочное значение жесткого решения, то результат декодирования окажется неправильным. На рисунке 1 приведены указанные характеристики.

Важно отметить, что наиболее нежелательным явлением является совпадение ошибочных решений с ЦМРС, имеющих высокий показатель. Именно этот факт приводит к ошибочному декодированию кодовых векторов при реализации процедуры ПД. Минимизировать подобный исход возможно только за счет применения метода «распространения доверия», когда отдельные ЦМРС повышают свои значения за счет алгебраических связей с

другими индексами принятой кодовой комбинации. Видимо реализация подобного подхода из-за своей непредсказуемости возможна только на пути комплексного применения алгебраических методов и регулярного метода повышения значений ЦМРС по Байесу, вытекающего из выражения (1).

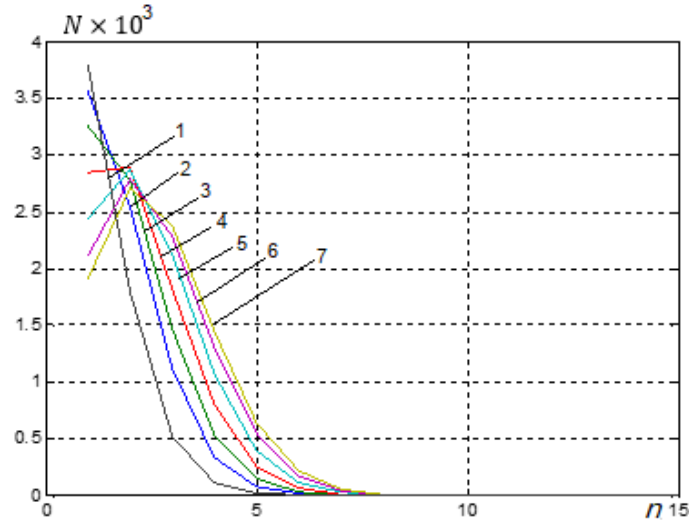


Рис. 1. Распределения оценок ЦМРС при $\lambda_{max} = 7$ и $\sigma^2 = 1$

Таблица 1

Частота ошибочных решений при $\lambda_{max} = 7$ и $\sigma^2 = 1$

λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
0.3443	0.2142	0.1412	0.0878	0.0535	0.0329	0.0215	0.0068

Аналогичные характеристики для варианта $\lambda_{max} = 3$ приведены на рисунке 2 и в таблице 2.

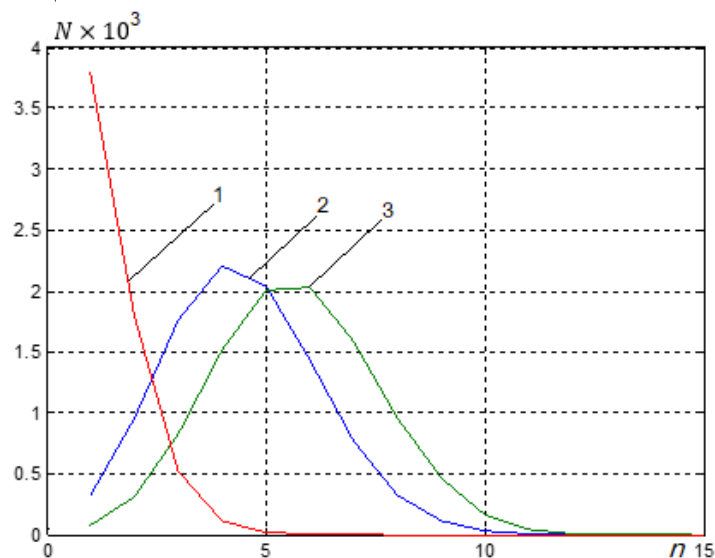


Рис. 2. Распределения оценок ЦМРС при $\lambda_{max} = 3$ и $\sigma^2 = 1$

Частота ошибочных решений при $\lambda_{max} = 3$ и $\sigma^2 = 1$

λ_0	λ_1	λ_2	λ_3
0.6138	0.2144	0.0689	0.0070

Заметно, что (по крайней мере, для минимальной и максимальной оценки) близость результатов испытания имитационной модели. Таким образом, изменение максимальной оценки в выражении (4) не привело к дефекту предположений о целесообразности замены $\lambda_{max} = 7$ выражения (4) на выражение $\lambda_{max} = 3$ для каналов с АБГШ. Следует заметить, что число испытаний имитационной модели в каждом эксперименте составляло 10^6 символов, что обеспечивает приемлемую погрешность процедуры моделирования.

Для решения задач аналитического моделирования процесса формирования ЦМРС на выходе оптического канала связи с учетом системы многообразных каскадных преобразований оптического сигнала приемником была предложена модифицированная модель гауссовского канала связи. При этом было доказано, что в подобных каналах целесообразно сохранять значение максимальной оценки МРС на уровне $\lambda_{max} = 7$. Например, аналитический результат оценки вероятности битовой ошибки для модуляции РАМ-4 может быть представлен выражением (5)

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-3\sigma}^0 e^{-\frac{(x - \sqrt{\frac{0,33E_b}{4}})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

Характеристика параметра P_b для модуляции РАМ-4 и обоснованного в работе диапазона значений дисперсии показана на рисунке 3, что соответствует многочисленным экспериментальным данным, полученным в исследованиях других авторов данной предметной области.

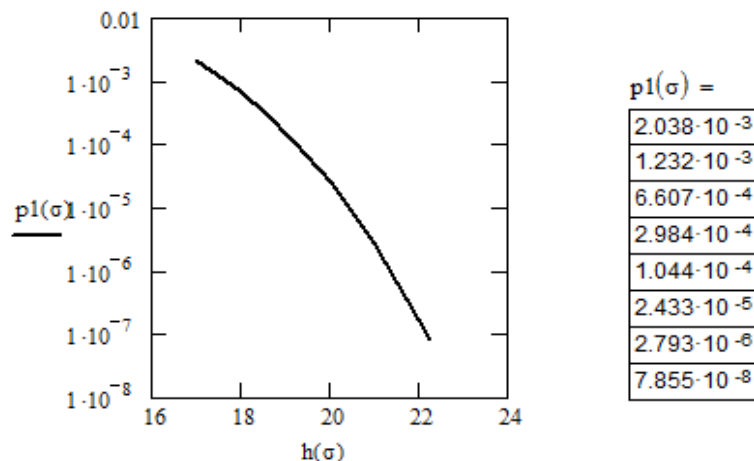


Рисунок 3. Вероятностная характеристика для РАМ-4

Графическое представление аналитической модели формирования ЦМРС в зависимости от каналов связи будет иметь вид представленные на рисунке 4.

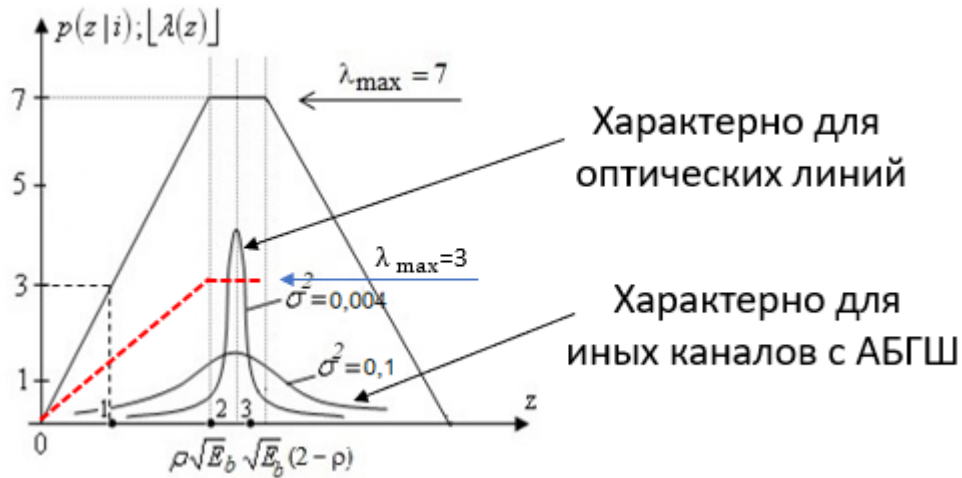


Рис. 4. Трансформация условной ПРВ в зависимости от типа канала

Для реализации правила (1) предлагается способ циклического сдвига проверяемых на четность символов с таким расчетом, чтобы на месте проверочного разряда находился символ с высоким значением ЦМРС. Одновременно с этим для целенаправленного изменения значения ЦМРС в системе реализации алгоритма «распространения доверия» в этой работе предлагалось исключать из проверочного соотношения для блоковых кодов наиболее надежные символы из числа проверяемых на четность. При этом сред исключенных символов могли оказаться как нулевые биты, так и символы, имеющие в качестве жестких решений значения единиц. В этом случае предложено выражение (1) привести к виду, который показан ниже.

$$L(d_1) \boxplus L(d_2) \approx L(d_1 \oplus d_2) \approx (-1)^{q+1} \times \text{sign}[L(d_1)] \times \text{sign}[L(d_2)] \times \min\{|L(d_1)| \cup |L(d_2)|\}, \quad (6)$$

где q – число единиц, вычеркнутых из списка данных проверки четности.

Алгоритм преобразований ЦМРС представлен на рисунке 5. Для уточнения возможностей алгоритма в работе был поставлен и проведен эксперимент, суть которого заключалась в выявлении преимуществ перехода на оценки ЦМРС в диапазоне от 0 до 3 в отличие от известных оценок от 0 до 7. Разработанная программа реализации алгоритма «РД» на основе программного продукта PYTHON показала возможность резкого сокращения (по сути на 50%) длительности цикла коррекции значений ЦМРС с целью их повышения и исправления жесткого решения.

Таким образом, определены оптимальные, в смысле выбора верхних граничных оценок, значения ЦМРС, отличающиеся учетом свойств мешающих факторов в каналах связи различной физической природы.

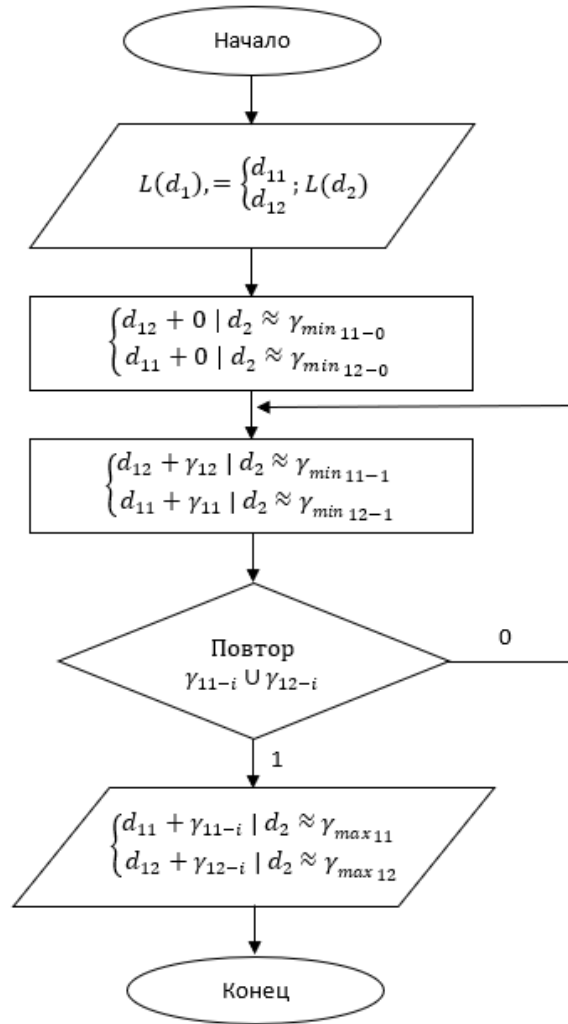


Рис.5. Реализация алгоритма «распространения доверия»

Предложена и доказана целесообразность применения метода комбинированного декодирования цифровых команд управления. Область декодирования данных в указанных условиях показана на рисунке 6.

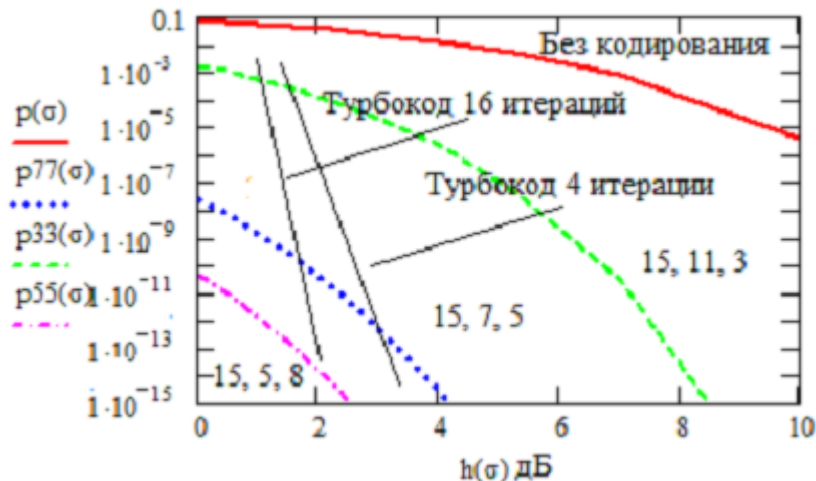


Рис. 6. Вероятность ошибки на бит при использовании кодов БЧХ длины 15 бит в каналах с АБГШ (аналитическое моделирование)

В третьей главе на основе положений алгебраической теории групп, колец и полей раскрывается закономерность изменения структуры проверочной матрицы $H_{ЭК}$ относительно аналогичной матрицы исходного кода G . Делается вывод о строгом соответствии выполненных перестановок нумераторов кодового вектора линейным преобразованиям вычисленных заранее эталонных проверочных матриц, которые входят в структуру порождающих матриц эквивалентных кодов.

Возможность предварительного вычисления требуемых проверочных частей порождающих матриц ЭК в систематической форме составляет базис для организации когнитивной процедуры поиска таких матриц. Доказывается, что перестановочное декодирование за счет этого нового свойства является единственным представителем среди многочисленных и разнообразных алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов, который в наибольшей степени способен реализовать процедуру когнитивной обработки оперативной информации.

В общем случае количество перестановок определяется выражением C_n^k . При этом среди всех допустимых перестановок наибольший интерес для двоичных кодов вызывают перестановки, которые приводят к вырожденным переставленным матрицам $Q_{k \times k}$, которые не способны привести к формированию ЭК. Такие матрицы должны выявляться в ходе декодирования в первую очередь, поскольку вызывают необходимость коррекции текущей перестановки за счет смены всего лишь одного символа. Поэтому в работе закономерностям выявления непродуктивных перестановок уделено особое внимание. Для короткого кода (7,4,3) может быть сгенерировано $C_7^4 = 35$ последовательностей, при этом продуктивные последовательности перестановок нумераторов символов, обеспечивающие получение ЭК приведены в таблице 3.

Таблица 3

Последовательности положительных решений в каноническом виде

1234	1236	1237	1245	1246	1256	1257
1267	1345	1346	1347	1356	1357	1457
1467	1567	2345	2347	2356	2357	2367
2456	2457	2467	3456	3467	3567	4567

Непродуктивные перестановки представлены в таблице 2.

Таблица 4

Последовательности отрицательных решений в каноническом виде

1235	1247	1367	1456	2346	2567	3457
------	------	------	------	------	------	------

Общее количество образцов матриц эквивалентного кода определяется выражением $N = C_n^k \times k! \times (n - k)!$. Для кода Хэмминга (7,4,3) необходимо около 141 килобит памяти КК. Но даже небольшое увеличение длины кода, потребует

значительного увеличения объема КК, например, для кода БЧХ (15,7,5) для хранения всех переставленных матриц необходима память в размере 11,15 терабайт. В работе вскрыты свойства перестановок, позволяющие уменьшить объем памяти КК за счет выявленных циклических закономерностей при формировании орбит перестановок.

Утверждение 1. Образующей комбинацией любого цикла (орбиты) называется та комбинация нумераторов, которая при суммировании всех ее элементов дает наименьшее значение среди оставшихся других подобных сумм комбинаций данной орбиты.

Действительно, любая перестановка нумераторов из множества всегда может быть циклически приведена к минимальным значениям нумераторов, которые определяют структуру перестановки и формируют ее образ.

Утверждение 2. Образующая комбинация цикла должна представляться в лексикографическом виде и с увеличением значений нумераторов по мере их циклического сдвига они должны сохранять лексикографическую структуру. Такой порядок способствует быстрому отысканию образующей комбинации и ее орбиты при любом начальном условии перестановки нумераторов в процедуре декодирования кодового вектора. В таблице приведены орбиты перестановок двоичного кода Хэмминга (7,4,3). Для удобства все перестановки представлены в лексикографическом формате.

Таблица 5

Орбиты перестановок кода (7, 4, 3)

G_1	G_2	G_3	G_4	$\Delta \equiv 0$
1234	1236	1245	1246	1235
2345	2347	2356	2357	2346
3456	1345	3467	1346	3457
4567	2456	1457	2457	1456
1567	3567	1256	1356	2567
1267	1467	2367	2467	1367
1237	1257	1347	1357	1247

В таблице 5 данные пятой орбиты ($\Delta \equiv 0$), которые указаны курсивом, не образуют ЭК, поскольку определители матриц этой орбиты и соответственно их переставленные варианты равны нулю. Указанная особенность характерна только для двоичных кодов. Четыре других орбиты позволяют сформировать эквивалентные коды и их порождающие матрицы, которые могут быть вычислены априори и занесены в память КК. Длина цикла орбит составляет k шагов. Здесь важно обратить внимание на комбинации нумераторов 4567 и 1567 из состава первой орбиты, далее на комбинацию нумераторов 3567 из состава второй орбиты. Нумераторы 567 принадлежат проверочной части порождающей матрицы кода. Столбцы этой матрицы линейно независимы, поэтому целесообразно использовать это свойство для сокращения объема ККД, подгоняя подавляющее большинство перестановок именно под нумераторы столбцов проверочной части порождающей матрицы кода.

Очевидно это требует дополнительных исследований, как указывалось во второй главе.

Утверждение 3. Каждой лексикографически упорядоченной образующей комбинации любого цикла соответствует единственная отличная от других проверочная матрица, которая является обязательным атрибутом эталонной порождающей матрицы систематического ЭК.

Указанное утверждение доказано численным методом. Его суть заключается в том, что приемник в группе нумераторов может зафиксировать любую последовательность из допустимых по параметрам кода, например, 7465. Приводя указанную комбинацию нумераторов к лексикографической форме, получаем 4567 и связываем полученную перестановку единственным образом как комбинацию первой орбиты.

Утверждение 4. При циклическом сдвиге вправо нумераторов образующей комбинации в лексикографически упорядоченном виде происходит только циклический сдвиг столбцов эталонной проверочной матрицы вправо, при условии, что наибольший из допустимых нумераторов справа при движении по циклу не обратился в наименьший нумератор слева. Это означает, что при циклическом сдвиге нумераторов от значения 1234 к значению 2345, проверочная матрица $H_{ЭК}$ трансформируется к виду, который единственным образом отвечает соответствующему ЭК.

Утверждение 5. В условиях последовательного циклического сдвига комбинации лексикографически упорядоченных нумераторов при переходе наибольшего допустимого нумератора по абсолютному значению справа в единичный элемент слева соответствует перемещению нижней строки части проверочной матрицы снизу-вверх и соответствующему циклическому перемещению остальных строк.

Утверждение 6. В случаях, отличных от лексикографически упорядоченного следования нумераторов перестановки, эталонная матрица орбиты приводится к требуемой проверочной матрице за счет сортировки столбцов эталонной матрицы в порядке, определяемом перестановкой из X_r , а сортировка строк - за счет порядка следования нумераторов, определяемого перестановкой из X_k .

Пусть приемник зафиксировал последовательности нумераторов надежных и ненадежных символов $\{F_{rel}\} = \{7154\}$ и $\{\overline{F_{rel}}\} = \{\overline{623}\}$ соответственно. Для решения задачи поиска ЭК первая из этих последовательностей приводится декодером к лексикографическому формату $\{F_{rel}\}_{lex} = \{1457\}$, из которого становится ясно, что данная перестановка относится к третьей орбите (см. таблицу 5). В памяти ККД для данной перестановки в лексикографическом (каноническом) формате хранится матрица вида:

$$H_{1245} = \begin{pmatrix} 1^3 & 1^6 & 1^7 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \dots H_{1457} = \begin{pmatrix} 1^2 & 0^3 & 1^6 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Обозначим в правом столбце матрицы нижним индексом нумераторы строк. Тогда:

$$H_{1457} = \begin{pmatrix} 1^2 & 0^3 & 1_1^6 \\ 1 & 1 & 1_4 \\ 0 & 1 & 1_5 \\ 1 & 1 & 0_7 \end{pmatrix} \Rightarrow H_{7154} = \begin{pmatrix} 1^2 & 1^3 & 0_7^6 \\ 1 & 0 & 1_1 \\ 0 & 1 & 1_5 \\ 1 & 1 & 1_4 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Выполнена перестановка строк. После чего выполняется перестановка столбцов:

$$H_{7154} = \begin{pmatrix} 1^2 & 1^3 & 0_1^6 \\ 1 & 0 & 1_1 \\ 0 & 1 & 1_5 \\ 1 & 1 & 1_4 \end{pmatrix} \Rightarrow H_{7154 \ 623} = \begin{pmatrix} 0_7^6 & 1^2 & 0_7^3 \\ 1 & 1 & 0_1 \\ 1 & 0 & 1_5 \\ 1 & 1 & 1_4 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет проверочную часть порождающей матрицы ЭК для перестановки вида $\{7154\}\overline{\{623\}}$. Это снижает объем ККД и резко уменьшает сложность вычислительного процесса поиска порождающей матрицы ЭК.

Покажем это на примере кода (7, 4, 3). Для такого кода допустимо общее число перестановок, равное значению $N_{общ} = \binom{7}{4} = 5040$. Собственно, такое число порождающих матриц ЭК должно быть записано в ККД, что крайне нерационально, но наличие орбит x_k и x_r существенно сокращает объем памяти ККД. Действительно, число перестановок для некоторого фиксированного кортежа x_k равняется $k!$, а для соответствующего кортежа из x_r равно $(n-r)!$. Поскольку для обозначенного в примере кода $k!=4!=24$, а $(n-r)!=3!=6$, то всего комбинаций перестановок для фиксированных орбит x_k и x_r равно $4! \times 3! = 144$, следовательно, объем ККД может быть уменьшен на три порядка, поскольку $5040:144=35$, с учетом длины цикла равного 7, получаем всего 5 комбинаций для образующих орбит из всего множества перестановок. Поиск номера орбиты и, следовательно, поиск соответствующей эталонной матрицы ЭК при произвольной комбинации нумераторов надежных символов возможен при использовании двух разработанных в диссертации алгоритмов. Центральной частью этих алгоритмов является приведение полученных в результате сортировки приемником нумераторов надежных символов в перестановку, организованную лексикографически. Далее возможен тривиальный перебор лексикографической перестановки по циклу до получения по свойству (1) перестановки наименьшего веса по сумме цифр,

входящих в перестановку. С учетом суммирования данных, сложность такого алгоритма, возможно оценить как $O = (n \log n)$.

При использовании второго алгоритма вычислительная система декодера ориентируется на перестановки, которые заканчиваются на максимальное значение нумератора, находящегося в крайнем правом разряде. Поскольку таких комбинаций в цикле ровно k , то сложность этого алгоритма можно оценить как $O = (k \log k)$, что более рационально с точки зрения использования вычислительного ресурса декодера.

Вводится понятие и разрабатывается метод фрактальной кластеризации разбиения пространства кодовых комбинаций избыточного кода, позволяющего решить задачу поиска комбинаций образующих орбит для вырожденных матриц без использования метода полного перебора всех допустимых перестановок нумераторов комбинаций. Метод основан на вложенности двоичных полей Галуа заданной степени расширения при формировании множества информационных векторов и знании весового спектра кода. Действительно, система полей Галуа имеет рекуррентную зависимость вида:

$$GF(2) \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 2 \downarrow 0:GF(2) \\ 2 \uparrow 1:GF(2) \end{array} \right\} = GF(2^2) \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 4 \downarrow 0:GF(2^2) \\ 4 \uparrow 1:GF(2^2) \end{array} \right\} = GF(2^3) \Rightarrow \dots, \quad (10)$$

где символика $\downarrow 0$ и $\uparrow 1$ означает замкнутость элементов двоичного поля, символ \vdots означает примыкание к расширенному полю степени j полей расширения $j-1$.

Например,

Таблица 6

Структура первых двух кластеров размерности 4 кода БЧХ (15,7,5)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	Вес
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	5
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	6
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	5
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	6
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	7
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	5
0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	5

В таблице 4 номер кластера определяется по первым пяти столбцам. Столбцы 6 и 7 должны содержать поле $GF(2^2)$. Если это условие нарушается, то соответствующая перестановка приводит к вырожденной матрице. Оценим это свойство по второй строке нулевого кластера. Заменяем столбец 7 на столбец А. В этом случае первая строка кластера «ноль» и его вторая строка оказываются линейно зависимыми. Это означает, что перестановка нумераторов вида

123456A оказывается линейно зависимой. Поскольку подобная перестановка является образующей для своей орбиты, то все циклические сдвиги этой комбинации нумераторов приведут к вырожденной матрице. Таких сдвигов будет 15. С учетом всех нулей в строке (исключаются символы номера кластера) получаем общее число образующих орбит по этой строке $C_5^2 = 10$. Подобным образом анализируются все строки кластера. Кластер номер один (нижние четыре строки таблицы 4) аналогично анализируется для поля $GF(2^3)$. Так перестановка вида 123467В приводит к вырожденной матрице. Из-за симметрии весового спектра кода полученный результат для всех строк указанных кластеров для нахождения общего числа вырожденных матриц просто удваивается.

В четвертой главе показана возможность построения декодеров помехоустойчивых кодов, использующих метод перестановочного декодирования на основе мягких решений символа в стирающем канале связи. Предложенный метод расширяет арсенал мягкого декодирования двоичных избыточных блочных кодов за счет исправления доли стираний, кратность которых выходит за пределы минимального кодового расстояния. При этом осуществляется сочетание кодовых и алгоритмических методов повышения достоверности при обмене информацией.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований:

1. Доказана целесообразность снижения максимальной оценки в системе формирования МРС, позволившая получить временной выигрыш при ранжировании нумераторов кодового вектора и одновременно обеспечить снижение на 50% числа итеративных преобразований в процессоре приемника цифровых команд управления при целенаправленной коррекции значений МРС в отличие от известных технических решений.

2. Доказана необходимость применения технологии обособленного дополнительного контроля именно проверочных разрядов кодового вектора в кодеках СУ с целью повышения эффективности процедуры поиска результативных перестановок по трансформации условных вероятностей нумераторов символов методом «распространения доверия».

3. Показано, что система предварительного вычисления подмножества эталонных матриц и их лексикографического хранения, обеспечивает снижение требований к объему памяти когнитивной карты декодера за счет использования свойств циклических орбит допустимых в коде перестановок. При этом снижение объема памяти когнитивной карты заменяется на экономный вычислительный процесс поиска образующей орбиты цикла перестановок.

4. Доказано, что регулярный метод поиска отрицательных подстановок кода на основе знаний его весового спектра совместно с применением метода кластерного разбиения общего пространства кодовых комбинаций, по

сравнению с методом прямого перебора, способствует повышению производительности кодеков. На примере кода БЧХ показано, что количество непроизводительных перестановок составляет около 10% от общего количества перестановок нумераторов.

Направление дальнейших исследований

В перспективе с целью повышения эффективности кодеков систем управления предлагается исследовать сочетание перестановочного декодирования и метода целенаправленной коррекции мягких решений символов в разрабатываемых кодеках на основе быстрого выбора надежных нумераторов и нейросетевых технологий с глубоким обучением.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ганин Д.В., Тамразян Г.М., Шахтанов С.В., Саид Б., Бакурова А.Д. Процедура поиска множества вырожденных матриц в системе перестановок двоичного блокового кода. // Автоматизация процессов управления. – 2019. – № 4 (58). – С.82-89.

2. Гладких А.А., Бакурова А.Д., Меновщиков А.В., Саид Б.А.С., Шахтанов С.В. Фрактальная кластеризация групповых кодов в системе вложенных полей Галуа. // Автоматизация процессов управления. – 2020. – № 4 (62). – С.85-92.

3. Саид Б.А.С., Пчелин Н.А. Модификация способа оценивания мягких решений символов и его верификация // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 1 (67). – С. 60-67.

Публикация в издании Scopus

1. THE CONCEPT FOR BIOMETRIC SYSTEM DEVELOPMENT BASED ON MODERN ERROR CORRECTING CODING. Gladkikh A.A., Volkov Al.K., Volkov An.K., Saeed B.A.S., Yudaev V.V. В сборнике: JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 862 (2020)32036, doi: 1088/1757_899X/862/5/052009

Список патентов

1. Патент № 2743854, Российская Федерация, СПК Н03М 13/05, Н03М 13/3784. Генератор комбинаций двоичного эквивалентного кода // Гладких А.А., Саид Б.А.С., Бакурова А.Д.

Публикации в других изданиях

1. МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ МЯГКИХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ Саид Б.А.С. В сборнике: ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ. DSPA - 2020. Доклады на 22-ой Международной конференции. Сер. "Цифровая обработка сигналов и ее применение" Москва, 2020. С. 247-252.

2. МЯГКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В СИСТЕМЕ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ. Саид Б.А.С. В сборнике: Современные проблемы проектирования, производства и

эксплуатации радиотехнических систем. Сборник научных трудов. Ульяновск, 2020. С. 145-147.

3. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ. Саид Б.А.С. В сборнике: РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ. сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции: в 6 т.. Воронеж, 2020. С. 316-321.

4. АЛГОРИТМ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА КОМБИНАЦИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОГО КОДА В СИСТЕМЕ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ. Саид Б.А.С. В сборнике: Вузовская наука в современных условиях. сборник материалов 54-й научно-технической конференции: в 3 ч. Ульяновск, 2020. С. 233-236.

5. ПРОЦЕДУРА ПОИСКА МНОЖЕСТВА ВЫРОЖДЕННЫХ МАТРИЦ В СИСТЕМЕ ПЕРЕСТАНОВОК ДВОИЧНОГО БЛОКОВОГО КОДА. Бакурова А.Д., Саид Басем А.С., Бакуров Д.Д. В сборнике: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ. 2-я Всероссийская конференция: доклады конференции. 2019. С. 128-132.

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ МНОЖЕСТВА ВЫРОЖДЕННЫХ МАТРИЦ В СИСТЕМЕ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ. Саид Басем А.С. В сборнике: Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. Сборник научных трудов. 2019. С. 177-181.

7. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ДВОИЧНЫХ ИЗБЫТОЧНЫХ КОДОВ. Саид Б.А.С. В сборнике: III Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. Материалы XXI Международной научно-технической конференции. 2019. С. 184-185.

8. РАБОТА ДЕКОДЕРА НА ОСНОВЕ ЛЕКСИКОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА. Саид Б.А.С. В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах. 2019. С. 6-9.

9. РАБОТА ДЕКОДЕРА С ЦИКЛИЧЕСКИМ СДВИГОМ НА ОСНОВЕ ЛЕКСИКОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА. Саид Б.А.С. Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2018. № 11. С. 169-172.

10. ДЕКОДИРОВАНИЕ С ПРОВОКАЦИЕЙ СТЕРТОГО ЭЛЕМЕНТА Басем С.А.С. Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем. 2014. № 9. С. 92-95.

Саид Басем Абдулсалам Салех

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОДЕКОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА БАЗЕ
КОГНИТИВНОГО ПРОЦЕССОРА**

Подписано в печать «__» _____ 2022 г.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,375. Тираж 100 экз. Заказ № ____

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32